

УДК 621.7.044

*Е. А. ФРОЛОВ, С. Г. ЯСЬКО, С. И. КРАВЧЕНКО.¹³***ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТЕЙ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ДЕТАЛЕЙ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ВЫТЯЖКЕ**

Для оценки возможности вытяжки листовых изделий без потери устойчивости был проанализирован процесс высокоскоростного деформирования заготовок. Установлено, что процесс получения качественных деталей связан с регулированием скорости разгона штампуемого рельефа и фланцевой части заготовки за счет искусственного увеличения радиуса закругления у перетяжного ребра матрицы. На экспериментальном основании получена эмпирическая зависимость относительного радиуса закругления ребра матрицы от коэффициента вытяжки, что позволяет проектировать технологический процесс высокоскоростного формообразования.

Ключевые слова: высокоскоростная вытяжка, тонколистовая заготовка, гибкость, устойчивость.

*Є. А. ФРОЛОВ, С. Г. ЯСЬКО, С. І. КРАВЧЕНКО***ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ПОВЕРХОНЬ ОСЕСИМЕТРИЧНИХ ДЕТАЛЕЙ ПРИ ВИСОКОШВИДКІСНОМУ ВИТЯГУВАННІ**

Для оцінювання можливостей витягування листових виробів без втрати стійкості було проаналізовано процес високошвидкісного деформування заготовок. Встановлено, що процес отримання якісних деталей пов'язаний з регулюванням швидкості розгону штампованого рельєфу та фланцевої частини заготовки за рахунок штучного збільшення радіуса заокруглення у перетяжного ребра матриці. На експериментальній основі отримана емпірична залежність відносного радіуса заокруглення ребра матриці від коефіцієнта витягування, що дозволяє проектувати технологічний процес високошвидкісного формоутворення.

Ключові слова: високошвидкісне витягування, тонколистова заготовка, гнучкість, стійкість.

*YE. A. FROLOV, S. G. YASKO, S. I. KRAVCHENKO***QUALITY ASSURANCE OF SURFACES OF AXISYMMETRIC PARTS AT HIGH-SPEED STRETCH PRESSING**

To assess the possibility of drawing sheet products without loss of stability, the process of high-speed deformation of blanks was analyzed. Experiments show that the end of the flange acceleration period for thin sheet stamping coincides with the design of the workpiece into a spatial semi-finished product whose depth of punching depends linearly on the radius of curvature of the constriction of the matrix. If the value of the radius of curvature is less than optimal, further preampling of the semi-finished product is carried out due to the prevailing stretching of the material of the bottom part of the workpiece. It is established that the process of obtaining qualitative details is related to the regulation of the speed of acceleration of the stamped relief and the flange part of the workpiece due to an artificial increase in the radius of curvature at the perimeter of the matrix. On the experimental basis, an empirical dependence of the relative radius of the curvature of the edge of the matrix on the drawing coefficient is obtained, which allows designing the technological process of high-speed shaping. Experimental studies have shown that the corrugations on the surface that arise during stamping with increased radii of curvature, as compared with the usual ones, do not exceed the maximum permissible values when they are eliminated under conditions of biaxial stretching.

Keywords: high speed drawing, thin sheet workpiece, flexibility, stability.

Введение. Высокоскоростная штамповка позволяет получать сложные по форме и точные по размерам изделия при значительной экономии металла и трудоемкости изготовления штамповой оснастки.

Анализ проблемы и постановка задачи исследования. Большое значение приобретает дальнейшее совершенствование процессов высокоскоростного пластического формообразования тонколистового материала.

Важной проблемой обработки металлов давлением является устойчивость процесса деформирования, как одного из основных условий получения изделий высокого качества. Повышение устойчивости формообразующих операций тонколистовой штамповки при применении импульсного нагружения обеспечивает снижение брака гофры на фланце и волнистость на поверхности детали (рис. 1) [1–4].



Рис. 1 – Характерный брак изделий при высокоскоростной вытяжке тонколистовых деталей. Возникновение потери устойчивости при высокоскоростной вытяжке зависит от скорости деформирования различных зон заготовки (фланцевая и донная части) и характера напряженного состояния присущего листовому металлу [4, 5]

Цель работы: разработка рекомендаций обеспечивающих изготовление качественных тонколистовых изделий с гибкостью $\lambda = d/\delta > 200$ (d, δ – диаметр и толщина стенки изделия) при высокоскоростной штамповке вытяжкой.

Основной материал. Для оценки возможности вытяжки без образования гофра на фланце и предотвращения чрезмерного утонения донной части изделия проанализируем условия вытяжки тонколистовой заготовки.

Как известно [5], перемещение материала при высокоскоростной штамповке можно разделить на два этапа: перемещение заготовки в период разгона и в период торможения.

Эксперименты показывают, что окончание периода разгона фланца при тонколистовой штамповке совпадает с оформлением заготовки в пространственный полуфабрикат, глубина проштамповки которого линейно зависит от величины радиуса закругления перетяжного ребра матрицы R_{np} . Если величина радиуса закругления меньше оптимальной, то дальнейшая доштамповка полуфабриката осуществляется за счет преобладающего растяжения материала донной части заготовки.

Для оценки кинематических условий вытяжки фланца можно воспользоваться уравнением [6]:

$$\frac{M \cdot v^2}{2} = k \cdot \pi \cdot d_0 \cdot \sigma_s \cdot \delta \cdot l \cdot e + \frac{M_\phi \cdot v_\phi^2}{2}, \quad (1)$$

здесь M, M_ϕ – соответственно масса донной части и фланца,

v, v_ϕ – скорости перемещения донной части и фланца,

σ_s – предел текучести штампуемого материала,

k – коэффициент динамичности,

d_0, δ, l – соответственно диаметр и толщина стенки детали, длина участка зоны одноосного растяжения,

e – деформация участка зоны.

Кинематическое условие (1) позволяет при известных значениях членов во второй части уравнения определить критические скорости перемещения донной части заготовки v в любой момент времени. Знание допустимой скорости перемещения донной части позволяет целенаправленно управлять технологическим режимом штамповки: внешней нагрузкой, геометрией матрицы, допустимой глубиной проштамповки f_n .

Так как наиболее значима оценка конечного этапа формообразования, то проведем анализ условия вытяжки (1) в период торможения фланца, когда скорость перемещения фланца $v \rightarrow 0$. Коэффициент динамичности $k \approx 1,2 \div 1,4$, средняя деформация зоны одноосного растяжения, примыкающей к перетяжному ребру матрицы, $e \leq 0,1$.

Несколько сложнее оценка величины зоны одноосного растяжения. Ее значение можно

установить либо экспериментальным путем с помощью скоростной видеосъемки, либо воспользоваться результатом проделанных ниже вычислений.

При определении размеров зоны одноосного растяжения – сжатия примем, что положение каждой точки деформирующейся донной части заготовки может быть описано системой уравнений постоянства объема при пластическом течении и дифференциальных соотношений между скоростями деформаций, записанных в соответствии с известной методикой [7] в сферической системе координат. Так как процесс деформирования осесимметричен, то перекосы и скручивание в тангенциальном направлении отсутствуют. Поэтому тангенциальная составляющая скорости равна $v_\phi = 0$, сдвиговые скорости деформаций $\varepsilon_{r\theta} = \varepsilon_{\theta r} = \varepsilon_{\phi r}$. Также учтем, что перемещения и скорости в направлении радиуса деформирующейся оболочки весьма мало влияют на положение зоны двухосного растяжения, следовательно, можно принять радиальную скорость $v_r = 0$. Тогда полная система уравнений [7] упростится:

$$\frac{\partial v_\theta}{r \partial \theta} + \frac{v_\theta}{r} \cdot \operatorname{ctg} \theta = 0; \quad (2)$$

$$\frac{\partial v_\theta}{\partial r} - \frac{v_\theta}{r} = 0; \quad (3)$$

где v_θ – меридианная составляющая вектора скорости, r, θ – координаты в сферической системе: радиус и угол, определяющие положение точки в меридианном сечении.

Система уравнений (2) и (3) имеет смысл только для зоны двухосного растяжения и допускает два решения:

$$v_\theta = -r \cdot \operatorname{ctg} \theta + C_1 \quad (4)$$

и

$$v_\theta = r \theta + C_2 \quad (5)$$

при значениях $\theta \leq 22^\circ$. Тогда размер зоны одноосного растяжения – сжатия можно найти:

$$l = r_0 - r_i = r_0 - \frac{r_0^2 + f_n^2}{2f_n} \cdot \sin 22^\circ. \quad (6)$$

Учтем, что на этапе торможения скорость перемещения фланца может быть принята $v_{cp} = 0$, а длина $l \approx (10 \div 15)$.

Тогда после нескольких преобразований уравнения (1) установим, что скорость донной части заготовки (относительно фланца) не должна превосходить

$$v \leq 3 \sqrt{\frac{\sigma_s}{\lambda \cdot \gamma}} \quad (7)$$

здесь γ – плотность штампуемого материала.

Выражение (7) показывает, что увеличение габаритов изделия (увеличение гибкости λ) приводит

к необходимости предусматривать мероприятия уменьшения скорости, которая при $\lambda > 400$ имеет значения $v \leq 25 \text{ м/с}$.

Анализ условий (1) и (7) позволяет прийти к выводу, что вытяжка фланца происходит в наиболее оптимальных условиях, когда скорость фланца v_ϕ не равна нулю и стремится к значениям v . Поэтому при высокоскоростной штамповке увеличение степени вытяжки связано с управлением периодом разгона штампуемой заготовки. Одним из решений этой задачи можно считать искусственное увеличение радиуса закругления протяжного ребра матрицы.

На основании экспериментов по штамповке деталей с гибкостью $150 < \lambda < 1000$ была получена полуэмпирическая зависимость относительного радиуса закругления протяжного ребра матрицы $\bar{R}_{np} = R_{np} / \delta$:

$$\bar{R}_{np} = (0,375 \cdot k_0 - 0,5) \lambda \quad (8)$$

устанавливающая связь со степенью вытяжки $k_0 = D_0 / d$ (D_0 – диаметр заготовки) и гибкостью, λ . График зависимости (8) приведен на рис. 2. Точками показаны значения \bar{R}_{np} , совпадающие со значениями, рекомендуемыми практикой листовой штамповки [8].

График $\bar{R}_{np} = f(k_0; \lambda)$ может служить номограммой для определения оптимальных радиусов закругления перетяжных ребер при известных значениях начальной степени вытяжки k_0 и гибкости λ .

Эксперименты показали, что гофры на поверхности, возникающие при штамповке с увеличенными по сравнению с обычно принятыми [8] радиусами закругления, не превышают предельно допустимые значения при их устранении в условиях двухосного растяжения

$$\bar{h} = \frac{h}{b} = 0,1 + \left(\frac{k_0}{k_\phi} \right)^2 \cdot (k_0 - 1) \leq 1,2, \quad (9)$$

здесь h, b – максимальная высота и ширина гофра на поверхности детали,

k_ϕ – степень вытяжки фланца, $k_\phi = D_0 / D_\phi$

(D_0, D_ϕ – диаметры заготовки до и после вытяжки).

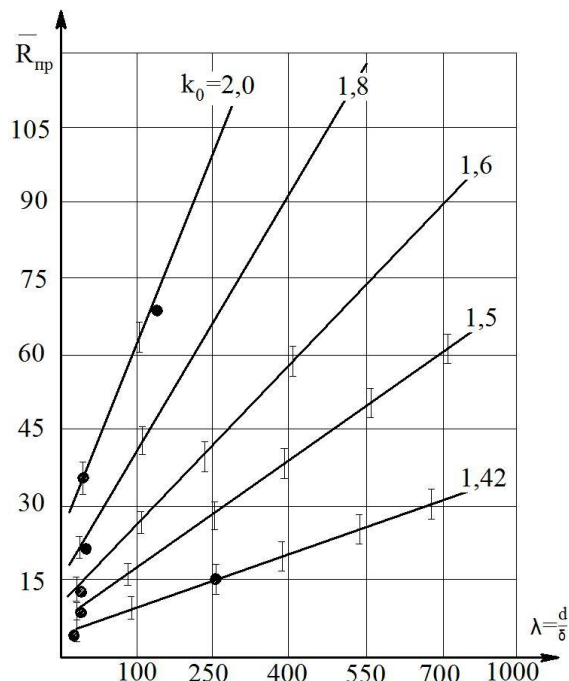


Рис. 2 – Рекомендуемые значения оптимальных радиусов закругления протяжных ребер

На рис. 3 показаны детали типа полусферы, отштампованные из заготовок АМц толщиной 0,5 мм диаметром 300 мм ($\lambda = 600$).

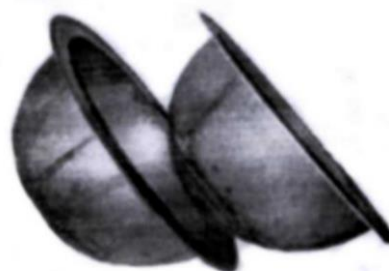


Рис. 3 – Детали типа «полусфера» отштампованные методом пневмодарной штамповки жидкостью

Утонение отштампованных деталей не превышало 20%. Глубина штамповки полуфабриката, как показали эксперименты, может находиться по формуле

$$f_n = \frac{f}{k_r} + \Delta, \quad (10)$$

где f – глубина детали,

k_r – технологический коэффициент $k_r \leq 1,25$,

Δ – экспериментальный коэффициент $\Delta = 1,04 \div 1,1$.

Заключение. Полученные в работе зависимости (8), (9), (10) позволяют прогнозировать техпроцесс высокоскоростной штамповки тонкостенных качественных деталей за счет искусственного регулирования величин радиусов закругления перетяжных ребер в матрице.

Список литературы

- Исаченков, Е.И. Основные направления повышения эффективности и качества листовой и объемной штамповки. *Качество и эффективность при листовой и объемной штамповке: сб. науч. МДНТП*, 1977, —, С. 3–8.
- Кривцов, В.С. Состояние и перспективы применения импульсных источников энергии для технологических процессов обработки металлов. [Авиационно-космическая техника и технология: тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». — Вып. 11/47. — Харьков: 2007. — С. 10–18.
- Нарыжный, А.Г. Факторы и этапы, определяющие точность импульсной штамповки осесимметричных деталей. *Авиационно-космическая техника и технология: тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». — № 11/47. — Харьков: 2007. — С. 125–132.*
- А.Я. Мовшович, Л.Г. Кузнецова, Е.А. Фролов, И.В. Манаенков Технологические предпосылки получения высокоточных деталей вытяжкой из листа методом пневмоударной штамповки. *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: темат. зб. наук. пр. ДДМА. — Краматорськ, 2009. — С. 352–356.*
- Мошнин Е.Н. *Технология штамповки крупногабаритных деталей.* —, Москва: Машиностроение, — 1973. — 240 с.
- Мельников, Э.Л. *Холодная штамповка днищ.* — Москва: Машиностроение, 1976. — 184 с.
- Алексеев, Ю.Н. *Вопросы пластического течения металлов.* — Харьков: Изд-во ХГУ, 1958. — 187 с.
- Романовский, В.П. *Справочник по холодной штамповке: справочное издание.* — 6-е изд., перераб. и доп., — Ленинград: Машиностроение, 1979. — 520 с.
- Krivtsov V.S., Borisevich V.K.. Sostoyanie i perspektivy primeneniya impulsnykh istochnikov energii dlya tekhnologicheskikh protsessov obrabotki metallov [State and perspectives of using pulse energy sources for technological processes of metal processing]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya* [Aerospace Engineering and Technology], 2007, no. № 11 (47), pp. 10–18.
- Naryzhnyy A.G. Faktory i etapy opredelyayushchie tochnost impulsnoy shtampovki osesimmetrichnykh detaley [Factors and stages that determine the accuracy of pulse punching of axisymmetric parts]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya* [Aerospace Engineering and Technology], 2007, no. № 11 (47), pp. 125–132.
- Movshovich A. Ya., Kuznetsova L. G., Frolov Ye. A., Manaenkov I. V. Tekhnologicheskie predposylki polucheniya vysokotochnykh detaley vytyazhkoy iz lista metodom pnevmoudarnoy shtampovki [Technological preconditions for obtaining high-precision details by drawing from sheet by the method of pneumatic impact punching]. *Temat. zb. nauk. pr. DDMA. Udoskonallennja procesiv i obladnannja obrobky tyskom v metalurghiji i mashynobuduvanni* [Improvement of processes and equipment for pressure treatment in metallurgy and machine building]. *Kramatorsk, Donbass State Machine-Building Academy Publ.*, 2008, no. 88, pp. 166–172.
- Moshnin Ye.N. Tekhnologiya shtampovki krupnogabaritnykh detale. [Technology of stamping large-sized parts]. *Moscow, Mashinostroenie Publ.*, 1973. 240 p.
- Melnikov E.L. Kholodnaya shtampovka dnishch [Cold stamping of bottoms]. *Moscow, Mashinostroenie Publ.*, 1976. 184 p.
- Alekseev Yu.N. Voprosy plasticheskogo techeniya metallov [Questions of plastic flow of metals]. *Kharkiv, KhGU Publ.*, 1958. 187 p.
- Romanovskiy V. P. Spravochnik po kholodnoy shtampovke [Reference book on cold stamping]. *Leningrad, Mashinostroenie Publ.*, 1979. 520 p.

References (transliterated)

Поступила (received) 25.09.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Фролов Євгеній Андрійович (Фролов Евгений Андреевич, Frolov Evgeniy Andreevych), — доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри технології машинобудування, ПолтНТУ ім. Юрія Кондратюка, м. Полтава, Україна. E-mail: frolov.poltntu@gmail.com; ORCID: 0000-0002-2691-5386.

Ясько Станіслав Георгійович (Ясько Станислав Георгиевич, Yasko Stanislav Georhyevych) — аспірант, ПолтНТУ ім. Юрія Кондратюка, Полтава, Україна. E-mail: s.g.yasko@gmail.com; ORCID: 0000-0001-6228-705X.

Кравченко Сергій Іванович (Кравченко Сергей Иванович, Kravchenko Sergiy) — кандидат технічних наук, доцент, ПолтНТУ ім. Юрія Кондратюка, Полтава, Україна. E-mail: 050Ser09@i.ua; ORCID: 0000-0003-3250-8645.